

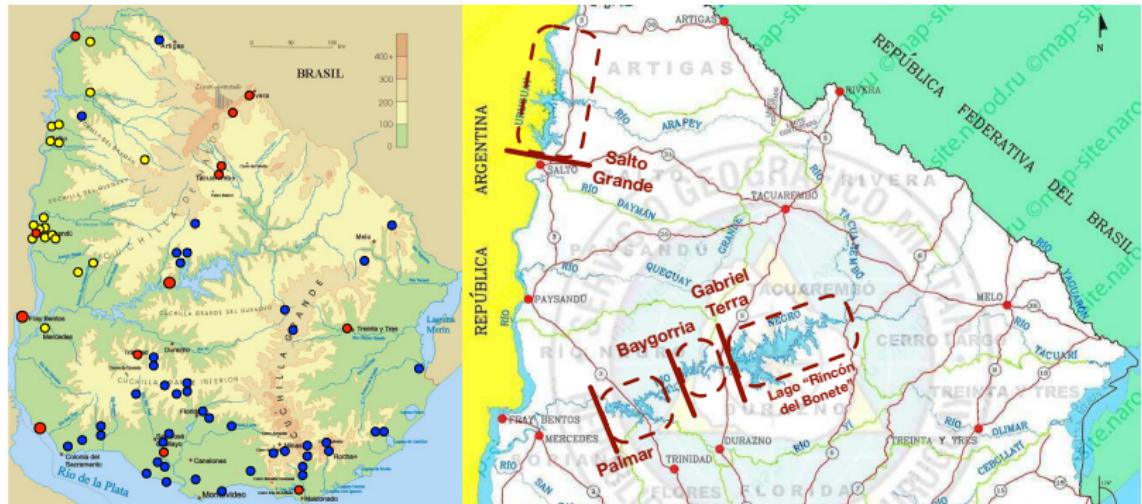
Inteligencia Computacional Aplicada a la Optimización de la Planificación y Operación del Sistema Eléctrico Nacional

Dr. Ing. Claudio Risso (crisso@fing.edu.uy)
MSc. Ing. Rodrigo Porteiro (rporteiro@ute.com.uy)
(UdelaR y UTE, Uruguay)

Jornadas Uruguayas de Ciencias de la Computación:
Ida HOLZ

(Viernes 12 de diciembre de 2025)

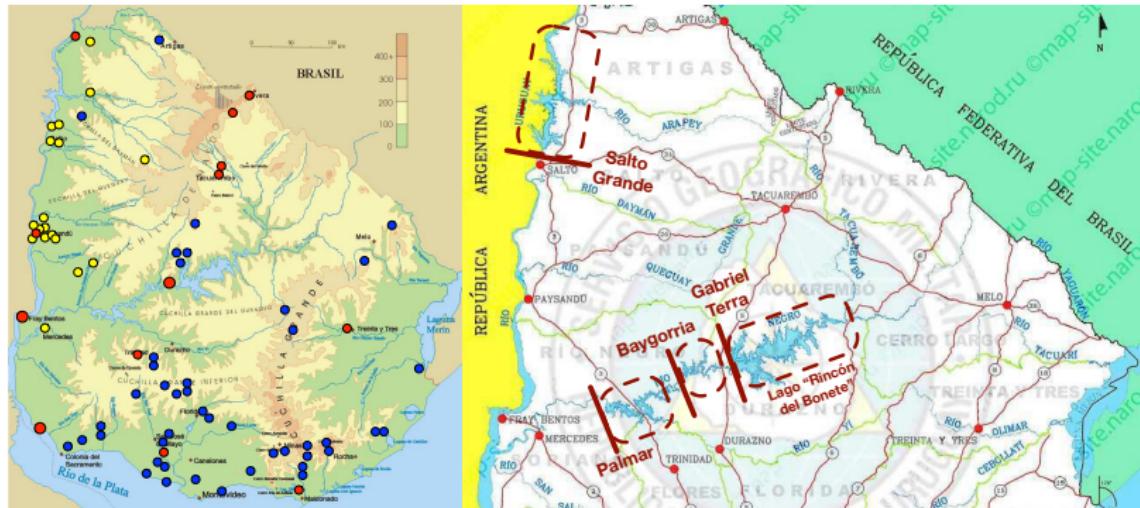
El Uruguay y su Matriz Energética



Uruguay cuenta con múltiples unidades de generación renovable dispersas en su territorio: Eólica (azul), Fotovoltaica (amarillo), Biomasa (rojo) e Hidroeléctrica (derecha).

El país atiende como norma más del 95% de su demanda eléctrica con fuentes renovables, con respaldo en unidades térmicas fósiles.

El Uruguay y su Matriz Energética



La Energía Hidráulica juega un rol esencial en este desarrollo, al servir indirectamente como acumulador del sistema.

Las inversiones en interconexión han mejorado las posibilidades de intercambios de energía con los países vecinos.

El Uruguay y su Matriz Energética

Energy by Type of Source	Installed Power Plant by 2024	Relative Subtotal	Relative Produced Energy			
			2020	2021	2022	2023
Biomass	300 MW	6.3%	7.7%	6.0%	6.5%	9.2%
Wind-power	1500 MW	31.6%	40.9%	29.4%	33.0%	38.5%
Solar	250 MW	5.3%	3.2%	2.6%	3.0%	3.4%
Río Negro	603 MW	12.7%	11.3%	14.0%	13.5%	9.7%
Salto Grande	945 MW	19.9%	18.4%	16.6%	24.7%	18.2%
Thermal Units	1150 MW	24.2%	6.0%	14.2%	8.9%	7.6%
National Total	4748 MW					
Imports	2570 MW		3.9%	0.3%	0.6%	11.4%
Exports	2570 MW		8.6%	16.9%	9.8%	2.0%

Ante una sequía total y desde el stock máximo de agua, el complejo hidroeléctrico del Río Negro concentraría el 90% de la energía hidráulica almacenada. Es nuestro gran acumulador.

El Uruguay y su Matriz Energética

Energy by Type of Source	Installed Power Plant by 2024	Relative Subtotal	Relative Produced Energy			
			2020	2021	2022	2023
Biomass	300 MW	6.3%	7.7%	6.0%	6.5%	9.2%
Wind-power	1500 MW	31.6%	40.9%	29.4%	33.0%	38.5%
Solar	250 MW	5.3%	3.2%	2.6%	3.0%	3.4%
Río Negro	603 MW	12.7%	11.3%	14.0%	13.5%	9.7%
Salto Grande	945 MW	19.9%	18.4%	16.6%	24.7%	18.2%
Thermal Units	1150 MW	24.2%	6.0%	14.2%	8.9%	7.6%
National Total	4748 MW					
Imports	2570 MW		3.9%	0.3%	0.6%	11.4%
Exports	2570 MW		8.6%	16.9%	9.8%	2.0%

No obstante, en condiciones normales, la mitad Uruguaya de la represa internacional provee 60% más de energía hidráulica.

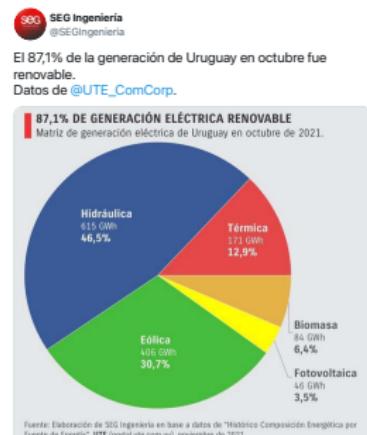
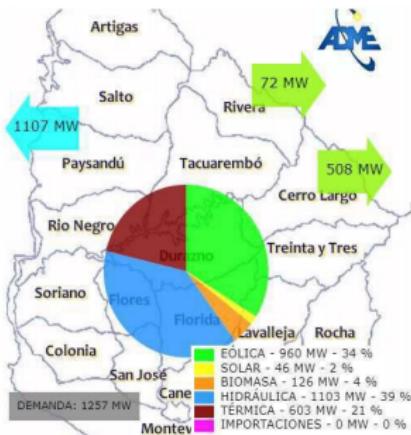
El Uruguay y su Matriz Energética

Energy by Type of Source	Installed Power Plant by 2024	Relative Subtotal	Relative Produced Energy			
			2020	2021	2022	2023
Biomass	300 MW	6.3%	7.7%	6.0%	6.5%	9.2%
Wind-power	1500 MW	31.6%	40.9%	29.4%	33.0%	38.5%
Solar	250 MW	5.3%	3.2%	2.6%	3.0%	3.4%
Río Negro	603 MW	12.7%	11.3%	14.0%	13.5%	9.7%
Salto Grande	945 MW	19.9%	18.4%	16.6%	24.7%	18.2%
Thermal Units	1150 MW	24.2%	6.0%	14.2%	8.9%	7.6%
National Total	4748 MW					
Imports	2570 MW		3.9%	0.3%	0.6%	11.4%
Exports	2570 MW		8.6%	16.9%	9.8%	2.0%

El aumento en la capacidad de interconexión ha facilitado los intercambios internacionales de energía.

Cambios en Coyuntura de Intercambios

Una inusual sequía en Argentina, Brasil y Paraguay disparó las exportaciones de energía entre 2020 y 2021.



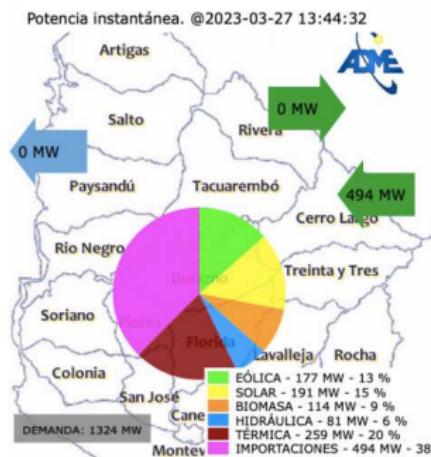
Fuente: Elaboración de SEG Ingeniería en base a datos de "Anuario Composición Energética por Fuente de Energía", UTE (portal.ute.com.uy), noviembre de 2021.

Parte del adicional se apoyó en las renovables no-convencionales y en la mejora de la eficiencia en el consumo, pero se sostuvo fundamentalmente en el despacho térmico convencional.

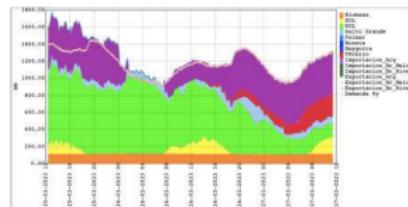
Cambios en Coyuntura de Intercambios

En 2023, la sequía se desplazó a Uruguay y la situación se revirtió, pasando en algunos momentos a atender gran parte de la demanda con las importaciones.

Balance de potencias. (ver consignas por central)



Despacho últimas 48 horas. (aproximado a partir de información del SCADA).



Valores acumulados.

Desde el inicio del	dia	mes	año	dia	mes	año
	GWh	GWh	GWh	%	%	%
Hidráulica	1.0	113.0	1,089.1	6.2	11.4	14.8
Edílica	3.2	295.9	1,089.4	20.5	29.7	35
Solar	0.8	34.8	130.9	5.2	3.5	4.2
Térmica	2.4	192.6	683.7	15.4	19.4	22
Biomasa	1.6	65.9	209.3	9.9	6.6	8.7
Imp.Bt	6.7	292.0	526.7	42.6	29.4	16.9
Imp.Ag	0.0	0.5	9.0	0.1	0	0.3
Total gen	15.8	994.8	3,108.1	100.0	100.0	100.0

Se observa que aun en situaciones antagónicas, es usual tener una fracción importante de producción térmica sostenida por la Central de Ciclo Combinado principalmente.

Modelos de Planificación

La gestión del sistema eléctrico se descompone en problema de distinto horizonte temporal. Entre los de planificación están:

Despacho Óptimo: Confecciona un plan optimizado (unidades de generación a usar) para atender la demanda residual en el corto plazo a costo mínimo.

Planificación mediano-plazo: Simula el uso optimizado de los recursos hidráulicos a lo largo de 2 o 3 años, para valorar así el agua en cada embalse.

Optimización de Inversiones: Simula la rentabilidad de inversiones potenciales en el sistema a lo largo de décadas.

Rodrigo les iba a presentar avances y el estado en los modelos de planificación de mediano y largo plazo.

Esta presentación pone foco en los modelos de despacho.

Actualización de Modelos

En las JUCC24 se presentó un modelo para la producción de energía en el Río Negro (paso horario). La función que ajusta la producción del complejo es:

$$\begin{aligned} P(x_{1h}, y_{1h}, v_{1h}, x_{2h}, y_{2h}, x_{3h}, y_{3h}, v_{3h}) = & \sum_{t=1}^T p_1^{(1)} x_{1h,t} + p_1^{(2)} x_{1h,t} v_{1h,t} - p_1^{(3)} x_{1h,t} v_{1h,t}^2 \\ & - p_1^{(4)} x_{1h,t}^2 - p_1^{(4)} x_{1h,t} y_{1h,t} + p_2^{(1)} x_{2h,t} - p_2^{(2)} x_{2h,t}^2 - p_2^{(2)} x_{2h,t} y_{2h,t} - p_2^{(3)} x_{2h,t} v_{3h,t} \\ & + p_2^{(4)} x_{2h,t} v_{3h,t}^2 + p_3^{(1)} x_{3h,t} + p_3^{(2)} x_{3h,t} v_{3h,t} - p_3^{(3)} x_{3h,t} v_{3h,t}^2 - p_3^{(4)} x_{3h,t}^2 \\ & - p_3^{(4)} x_{3h,t} y_{3h,t} + p_3^{(5)} x_{3h,t}^3 + p_3^{(5)} x_{3h,t} y_{3h,t}^2 + 2p_3^{(5)} x_{3h,t}^2 y_{3h,t}, \end{aligned}$$

para constantes $p_i^{(j)}$ separadas hasta en 21 órdenes de magnitud.

El valor de P indica la energía [MWh] generada en cada hora, mientras que x_{ih} , y_{ih} y v_{ih} corresponden respectivamente al *turbanado* [$\frac{m^3}{s}$], al *vertido* [$\frac{m^3}{s}$] y *volumen* [m^3] del embalse para las centrales Bonete ($i = 1$), Baygorria ($i = 2$) y Palmar ($i = 3$).

Actualización de Modelos

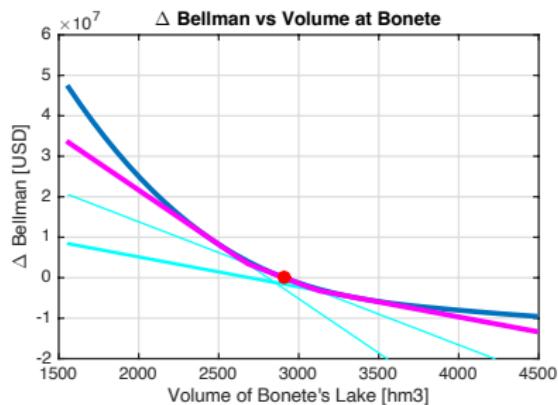
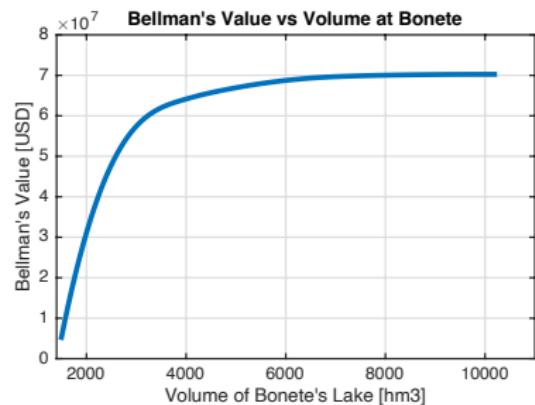
El MIP para optimizar la producción del complejo hidroeléctrico era

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{x_{ih}, y_{ih}, v_{ih}} & ca_1h(v_{1h,0} - v_{1h,T}) + ca_3h(v_{3h,0} - v_{3h,T}) + CF \sum_{t=1}^T (d_t - g_{h,t}) \\ d_t \geq g_{h,t}, & (i) \\ g_{h,t} = g_{1h,t} + g_{2h,t} + g_{3h,t}, & (ii) \\ g_{1h,t} = Pt\hat{Bon}(x_{1h,t}, y_{1h,t}, v_{1h,t}), & (iii) \\ g_{2h,t} = Pt\hat{Bay}(x_{2h,t}, y_{2h,t}, v_{3h,t}), & (iv) \\ g_{3h,t} = Pt\hat{Pal}(x_{3h,t}, y_{3h,t}, v_{3h,t}), & (v) \\ v_{1h,t} = v_{1h,t-1} + 3600(a_{1h,t} - x_{1h,t} - y_{1h,t}), & (vi) \\ x_{2h,t} + y_{2h,t} = a_{2h,t} + x_{1h,t-8} + y_{1h,t-8}, & (vii) \\ v_{3h,t} = v_{3h,t-1} + 3600(a_{3h,t} - x_{3h,t} - y_{3h,t} + x_{2h,t-16} + y_{2h,t-16}), & (viii) \\ (x_{ih}, y_{ih}, v_{ih}) \in (X, Y, V), & (ix) \end{array} \right.$$

El horizonte de planificación es de 15 días, cinco veces mayor al usado anteriormente pero necesario para capturar la dinámica de los contratos de intercambio.

Actualización de Modelos

En el correr de 2025 se corrigió el Costo del Agua en Bonete



Por lo prolongado de su dinámica, el *valor del agua* en Rincón del Bonete debe venir de un sistema de más largo plazo.

Esos sistemas realizan simulaciones encadenadas del despacho, usando soluciones intermedias heurísticas.

Actualización de Modelos

En el correr de 2025 se corrigió el Costo del Agua en Bonete y se agregaron componentes nuevos, incorporando ahora:

Salto Grande: Se ajustó la producción de Salto Grande, para luego integrarla al MIP principal.

Costo de Falla: Se reescribió el Costo de Falla, que ahora es exactamente establecido en la regulación.

Unidades Térmicas: Se incorporó una unidad térmica simple (test).

Intercambios Comerciales: Se incorporó un contrato de opción estándar para los intercambios comerciales.

$$\begin{aligned} P(x_{4h}, y_{4h}, v_{4h}) = & \sum_{t=1}^T p_4^{(1)} x_{4h,t} + p_4^{(2)} x_{4h,t} v_{4h,t} - p_4^{(3)} x_{4h,t} v_{4h,t}^2 - p_4^{(4)} x_{4h,t}^2 \\ & - p_4^{(4)} x_{4h,t} y_{4h,t} + p_4^{(5)} x_{4h,t}^3 + p_4^{(5)} x_{4h,t} y_{4h,t}^2 + 2p_4^{(5)} x_{4h,t}^2 y_{4h,t}, \end{aligned}$$

Actualización de Modelos

En el correr de 2025 se corrigió el Costo del Agua en Bonete y se agregaron componentes nuevos, incorporando ahora:

Salto Grande: Se ajustó la producción de Salto Grande, para luego integrarla al MIP principal.

Costo de Falla: Se reescribió el Costo de Falla, que ahora es exactamente establecido en la regulación.

Unidades Térmicas: Se incorporó una unidad térmica simple (test).

Intercambios Comerciales: Se incorporó un contrato de opción estándar para los intercambios comerciales.

El modelo usaba una referencia lineal $CF \sum_{t=1}^T (d_t - g_{h,t})$.

El reglamento uruguayo establece penas progresivas:

Demand Step (% D_t)		0% a 2%	2% a 7%	7% a 14.5%	14.5% a 100%
Failure Cost [USD/MWh]		370	600	2400	4000

Actualización de Modelos

En el correr de 2025 se corrigió el Costo del Agua en Bonete y se agregaron componentes nuevos, incorporando ahora:

Salto Grande: Se ajustó la producción de Salto Grande, para luego integrarla al MIP principal.

Costo de Falla: Se reescribió el Costo de Falla, que ahora es exactamente establecido en la regulación.

Unidades Térmicas: Se incorporó una unidad térmica simple (test).

Intercambios Comerciales: Se incorporó un contrato de opción estándar para los intercambios comerciales.

Una Planta Térmica Simple de capacidad 200MW y costo lineal se reduce a incorporar $ct_1 \sum_{t=1}^T g_{1t,t}$ en la función de costos, y cotas a la producción $0 \leq g_{1t,t} \leq 200$.

Actualización de Modelos

En el correr de 2025 se corrigió el Costo del Agua en Bonete y se agregaron componentes nuevos, incorporando ahora:

Salto Grande: Se ajustó la producción de Salto Grande, para luego integrarla al MIP principal.

Costo de Falla: Se reescribió el Costo de Falla, que ahora es exactamente establecido en la regulación.

Unidades Térmicas: Se incorporó una unidad térmica simple (test).

Intercambios Comerciales: Se incorporó un contrato de opción estándar para los intercambios comerciales.

Al ensamblar los agentes la generación g_t en hora t queda

$$g_t = g_{1h,t} + g_{2h,t} + g_{3h,t} + r \cdot g_{4h,t} + g_{1t,t},$$

donde $0 \leq r \leq 1$ es el ratio de Salto Grande hacia Uruguay.

Actualización de Modelos

En el correr de 2025 se corrigió el Costo del Agua en Bonete y se agregaron componentes nuevos, incorporando ahora:

Salto Grande: Se ajustó la producción de Salto Grande, para luego integrarla al MIP principal.

Costo de Falla: Se reescribió el Costo de Falla, que ahora es exactamente establecido en la regulación.

Unidades Térmicas: Se incorporó una unidad térmica simple (test).

Intercambios Comerciales: Se incorporó un contrato de opción estándar para los intercambios comerciales.

También se desarrolló una herramienta de software, en el contexto de un Proyecto de Grado (Ing. Computación) recientemente concluido, que facilita el uso de estos modelos mediante un desarrollo orientado a objetos.

Ejemplo (Importaciones de Brasil)

Las características del contrato son las siguientes:

- i) En la hora 1 (primer instante de la planificación) el contrato puede estar inactivo: no se recibe uno en funcionamiento;
- ii) La activación del contrato puede decidirse en cualquier momento hasta el día 8 inclusive: hasta la hora 193;
- iii) En caso de ser activado, el contrato de importación se debe sostener por 7 días seguidos (i.e., por 168 horas, incluyendo la de activación);
- iv) El contrato provee un límite de potencia para las importaciones de hasta 100MW, a un costo de 80 USD/MWh;
- v) Esa energía deberá pagarse, ya sea que ella se consuma o no, así que la activación equivale a incurrir en un gasto fijo de $C_I = 1,344,000$ USD.

Ejemplo (Importaciones de Brasil)

Un MIP para capturar los términos del contrato es

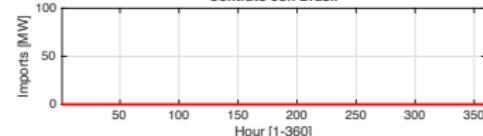
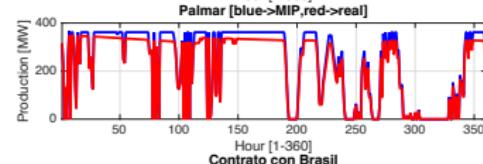
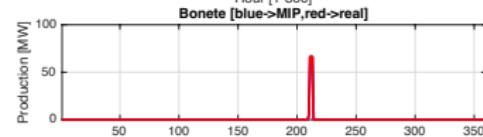
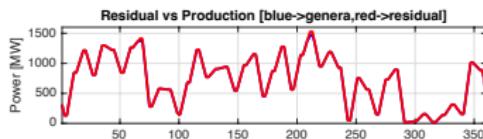
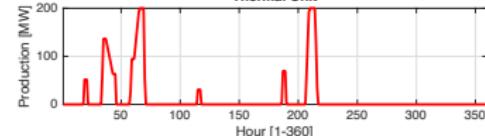
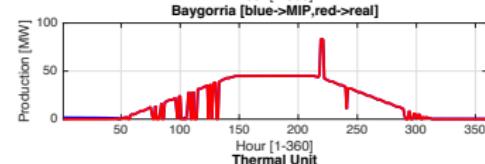
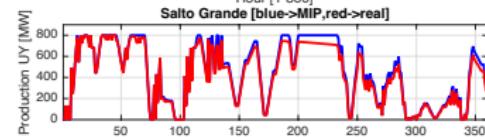
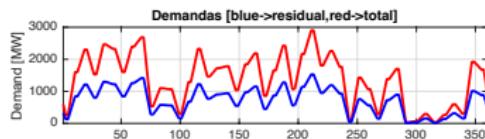
$$\left\{ \begin{array}{l} -167x_{1i,1} + \sum_{t=2}^{168} x_{1i,t} \geq 0, \\ 167(x_{1i,\bar{t}-1} - x_{1i,\bar{t}}) + \sum_{t=\bar{t}+1}^{\bar{t}+167} x_{1i,t} \geq 0, \quad 2 \leq \bar{t} \leq 193, \\ x_{1i,\bar{t}-1} - x_{1i,\bar{t}} \geq 0, \quad 194 \leq \bar{t} \leq 360, \\ \sum_{t=1}^{360} x_{1i,t} \leq 168. \end{array} \right. \begin{array}{l} (i) \\ (ii) \\ (iii) \\ (iv) \end{array}$$

Se incluye la variable $y_{1i} \geq 0$ para capturar el costo de activación:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min C_I \cdot y_{1i} \\ y_{1i} \geq x_{1i,1}, \\ y_{1i} \geq x_{1i,t} - x_{1i,t-1}, \quad 2 \leq t \leq 193, \\ y_{1i} \geq 0, \end{array} \right. \begin{array}{l} (i) \\ (ii) \\ (iii) \end{array} .$$

Soluciones a Instancias de Test

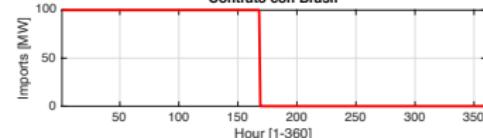
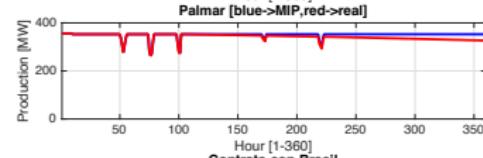
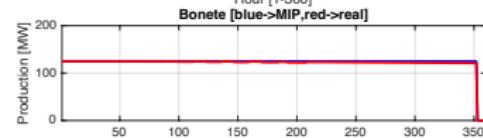
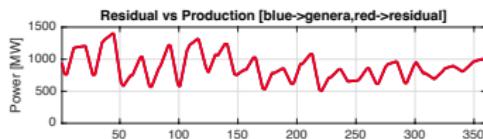
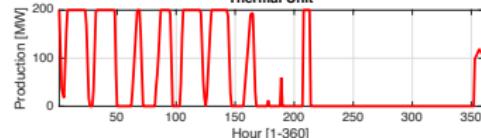
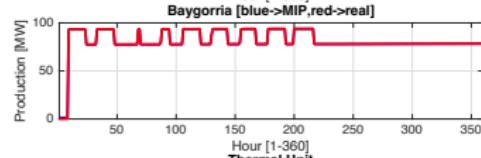
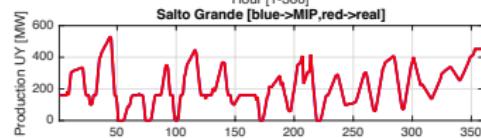
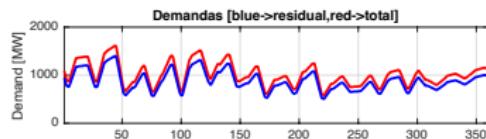
Se resolvió el problema en 102 instancias confeccionadas sobre datos reales. Algunas soluciones representativas son:



Solución con el mínimo costo de despacho: -17,240,336 USD.

Soluciones a Instancias de Test

Se resolvió el problema en 102 instancias confeccionadas sobre datos reales. Algunas soluciones representativas son:



Solución para la mediana de la demanda residual en el test-set.

Conclusiones y Trabajo Futuro

Hemos verificado que la optimización del sistema eléctrico nacional puede realizarse con alta precisión mediante el uso de MIPs y solvers estándar en horizontes de dos semanas.

Se está investigando cómo generar escenarios de Demanda Residual de quince días, para confeccionar una extensión estocástica del problema.

En paralelo, se han hecho avances en el uso de Redes Neuronales (RN) entrenadas sobre soluciones (20k-200k) de referencia como *Heurística* a ser usada en sistemas de más largo plazo.

Para que el uso de RN en modelos de mediano y largo plazo sea efectivo, se investigan estrategias que combinen RN con descomposición matemática.

Del proyecto surgieron siete publicaciones (5 online, 2 en edición), una tesis de Maestría y un Proyecto de Grado. Se está trabajando en tres artículos más, y está iniciando otra tesis de maestría.



Muchas gracias por
vuestra atención